

(21)

JP 2006-522938 A 2006.10.5

、石炭燃焼ユーティリティボイラ (coal-fired utility boiler) において酸素と水 (温度) と一酸化炭素とを監視することが極めて有用である。適している吸収線と、したがって、適しているレーザ発振周波数とが、燃焼室の中を通過するレーザプローブ経路長が10メートルに等しく、かつ、各化学種のモル百分がCO (1%)、O₂ (4%)、CO₂ (10%)、および、H₂O (10%) であるという前提に基づいて選択されることが可能である。周波数の選択のために、プロセス温度が、石炭燃焼発電所で典型的に見られる温度よりもわずかに高い1800 Kであると仮定されることが可能であるが、このクッションは計算における安全係数の役割を果たす。

【0035】

例えば、次の基準に合致する3つの水吸収線がTDLASのために選択されることが可能である。

1. それぞれに ~ 1000 、 2000 、および、 3000 cm^{-1} のより低い状態エネルギー。
2. 共振時に約20%のビーム吸収を生じさせる約0.1~0.4の便利な吸光度を実現する。
3. 最適の状況が、安価で高出力のDFEダイオード遠距離通信用レーザが使用可能である1250 nmから1650 nmの範囲内の遷移を使用することである。
4. 遷移が容易な多重化を可能にするように適切に分離されなければならない。
5. 選択された波長が、既存の(ア)マルチプレクサ格子によって効率的に回折させられなければならない。

【0036】

適切な水吸収線が次の波長で生じる。

US04/10048

故意に残されたページ

白紙

【0037】

【表1】

表1

波長 (nm)	波数 (cm ⁻¹)	より低い状態 エネルギー (cm ⁻¹)	格子次数	1800 Kかつ10M における吸収	UNP格子効率 (モデル)
1243.0849	7412.432	1606.67	6.87	19.7%	81%
1376.4507	7265.062	3581.662	6.73	28.1%	77%
1394.9305	7170.872	1045.058	6.65	6.8%	72%

【0038】

他のあらゆる燃焼ガスからの干渉は想定されていない。干渉の可能性が最も高い化学種であるCO₂がモデル化され、および、1.3ミクロンから1.4ミクロンの範囲内では強い干渉線が存在しない。

【0039】

同様に、適している一酸化炭素線が、引例として組み入れられている上記のEbertの研究に基づいて選択されることが可能である。適している一酸化炭素線が、石炭燃焼ユーティリティボイラ内でR (24) 線を使用して1559.562 nmで発見されている。この線の選択が、水と二酸化炭素とからの干渉を回避する。既知の格子が、光通信C帯にあるので、この波長範囲内で極めて効率的である。この波長における吸光度が0.7%であると予測される。

【0040】

さらに、酸素が760.0932 nmで測定されることが可能である。好ましい (適)

(22)

JP 2006-522538 A 2006.10.5

多重化格子効率がこの範囲内では40%にすぎないことが算出されるが、適しているレーザー出力が適切な測定効率を得るために使用可能であるべきである。

【0041】

本明細書で説明するように、TDLAS検出装置のピッチ側とキャッチ側の両方でのファイバ結合の使用が、ピッチ光学部品とキャッチ光学部品の厳密なアラインメント調整を必要とする。能動アラインメント調整が、選択されたアラインメント波長を用いて行われることが好ましい。採用可能な1つのアラインメント波長が660nmであるが、これは、高出力(45mW)ダイオードがその周波数で入手可能であり、かつ、660nmが14次格子動作のピークの付近にあるからである。他のアラインメント波長が同等に適しているかまたはそれ以上に適していると判断されることがある。

15

【0042】

要約すると、本発明において具体化されるTDLASのためのプローブビームに多重化するために選択された適切な波長の組が図2に示されている。この波長の組が、石炭燃焼発電所の検出と制御とに適しているTDLAS検出装置の一実施形態のためのものであるということに留意されたい。他の波長の組が同様に適していることが可能である。

【0043】

【表2】

表2

目的	波長 (nm)
アラインメント	660
O ₂ h-a帯	760.0932
H ₂ O (中程度の温度線)	1349.0849
H ₂ O (高温度線)	1376.4507
H ₂ O (低温度線)	1394.5305
CO (2.0) オーバートーンのR (24)	1559.562

29

【0044】

多重化ビームを使用するTDLASの具体的な利点

波長多重化プローブビームを使用するTDLASの具体的な利点が、温度測定値の精度の向上である。TDLASを使用して正確な濃度測定を行うためには、監視対象のガスの温度を知らなければならない。分子吸収の強度は温度の関数である。従って、吸収特徴の振幅を濃度に変換するためには、温度を知らなければならない。COのような燃焼化学種の濃度を測定しようとする以前の幾つかの試みは、定量化における誤りの原因となる不十分な精度の温度測定値という欠点を有する。これは、伝統的に温度測定を全く含まない、ダイオードレーザーに基づいたアンモニアスリップ監視装置の場合に特に当てはまる。本発明の検出システムでは、温度は、2つ以上の分子水線の強度の比率を測定することによって求められてよい。この2つの線の積分強度の比率は(システム全体の圧力が一定不変であると仮定すると)温度だけの関数である。したがって、原理的には、2つの線が正確な温度を与える。しかし、(工業燃焼プロセスにおいて典型的に見られるような)不均一な温度分布の場合には、2つの線は温度分布を求めるには不十分である。こうした不均一な温度分布の場合には、2つの線は「経路平均(path-averaged)」温度だけを求めることが可能であるにすぎない。これとは対照的に、(同一の化学種の)3つ以上の線の積分振幅を測定することが、温度の不均一性が調査されることを可能にする。この技術の例が、Sanders、Wang、Jeffries、および、Hansonによって“Applied Optics” (vol.40, num.24, 20 August 2001)においてプローブ分子として酸素を使用することによって示されており、このことは全体として本明細書に引例として組み入れられている。この好ましい技術は、照準線に沿って測定されたピーク強度の分布が、例えば

39

49

59

(23)

JP 2006-522938 A 2006.10.5

、その経路の一方の半分が300 Kでありかつその他方の半分が700 Kであるので、例えば500 Kの平均温度における経路とは同一でないということに基づく。

【0045】

より正確な温度測定という利点に加えて、多重化プローブビームの使用は、2つ以上の燃焼ガス化学種の同時監視を可能にし、および、燃焼プロセス全体にわたってのより厳密な制御を可能にすることができる。

【0046】

エシエル格子に基づいた装置

本発明は、遠距離通信産業で使用するために設計された比較的安価でありかつ一般的に入手可能な光学部品の使用から利益を得る。こうした遠距離通信装置は、このシステムのピッチ側とキャッチ側をファイバ結合するために適切に機能する。遠距離通信用途は、典型的には、一定不変の値（例えば、0.8 nm）の差で比較的近接して互いに間隔をおいて分離させられている波長の複数の光ビームを受け入れる光学マルチプレクサを使用する。その次に、光ビームは、一般的に、単一モードの光ファイバ上に結合される。デマルチプレクサが逆のプロセスを行う。遠距離通信機器は、典型的には、1520 nmから1620 nmの波長で動作するように設計されており、および、1528 nmから1563 nmの光学C帯が最も多く利用されている。

【0047】

（デ）マルチプレクサの場合には、同一の物理装置が、その装置の中を通過する光の方向に応じて、多重化と逆多重化のどちらにも使用されてよい。従って、本明細書で使用される術語「マルチプレクサ」すなわち「mux」は、多重化機能と逆多重化機能の両方を含むものとして理解されるだろう。

【0048】

光学マルチプレクサが、多重化／逆多重化機能を果たすために幾つかの技術のどれかを使用してもよい。しかし、エシエル格子によるマルチプレクサが、非常に単純でコンパクトな設計の形に実装できるので有利である。エシエル格子は、典型的には45度よりも大きいブレース角を有する、一次以外の次数で動作する比較的目が粗い回折格子である。高次の動作と組み合わされたエシエル格子の目の粗い縦間隔が、その装置がコンパクトであることを可能にする大きな角分散を結果的に生じさせる。

【0049】

遠距離通信用途の中には、C帯の完全に外側の他の波長（例えば、1310 nm）が光学マルチプレクサによって同時処理されることを必要とする用途があることがある。さらに、本発明のTDLSA検出／制御装置のような遠距離通信分野以外の用途が、例えばおよそ数百 nmの間隔のような互いに広く間隔が開けられている波長のレーザー光の多重化を必要とすることがある。エシエル格子に基づく多重化検出装置の利点を示す例が図4から図7に示されている。図4は、光84が一方の側から光86を貫く形に方向付けられているガス検出装置82を示す。光の他方の側にあるセンサ88が伝送される光を検出し、および、どれほど多くの光が光86中のガスによって吸収されているかを測定する。図4に示されている装置では、単一の光ビームだけが光86の中を通過させられる。この光の波長が、特定のガスの吸収波長に適合するように選択されてよい。あるいは、この代わりに、その光は、光86の中を通過した後例えばプリズムによって様々な波長に分割される白色光であってもよい。その次に、検出対象の波長の各々における吸光度が測定されることが可能である。

【0050】

わずかにより高度な従来技術の代替案として、図5に示されている装置のような装置が、n個の別々の光ビーム90A-90nを光92の中を通過させるために使用されてよい。光ビーム90A-90nの各々は互いに異なる検出対象の波長の光ビームであり、および、光92の他方の側にあるセンサ94A-94nが、選択された検出対象ガスの相対量を示す、各波長における吸収を測定する。複数の別々のビームを使用することには幾つかの欠点がある。第1に、光に対するアクセスが制限される可能性があり、および、限られ

(24)

JP 2006-522938 A 2006.10.5

た空間の中を通して複数のビームを放射しようとする試みは、不可能ではないとしても、困難であり得る。第2に、典型的には、炎の中の乱流と不均一性のポケット (pockets of non-uniformity) とが存在する。複数のビームは、非常に接近する形で互いに間隔があいていても、同一の標本採取空間の中を通過しない可能性があり、および、したがって、ばらつきのない結果または比較可能な結果を生じさせない可能性がある。最後に、複数ビーム装置では、放射/検出光学部品と検出器とが、単一ビーム装置における放射/検出光学部品および検出器と比較して、より複雑で高コストである。

【0051】

本発明のエシエル格子マルチプレクサに基づく検出装置は、従来の技術を上回る大きな利点を有する。エシエル格子は、典型的には45度より大きいブレース角を伴って1次以上の次数で動作することが可能であることによって、優れた柔軟性を実現する。例えば、Zolo Technologies, Inc. の Zmux™ は、1545 nm において6次でリトロー配置の形で動作するように最適化されており、および、機械的に解線が引かれた格子が171.4線/mmの線間隔と52.75度のブレース角とを有する。リトロー配置に関する格子の式は、

$$m\lambda = 2d \sin \theta, \quad (1)$$

であり、前式中で m は次数であり、 λ は波長であり、 d は解線の間隔であり、および、 θ はブレース角である。

【0052】

特定の格子の場合に、 $m\lambda$ は定数である。上記のZmux格子の場合には、 $m\lambda = 6$ (1.545) = 9.27ミクロンである。この格子は、6次において1.545ミクロンの場合に最適の効率を実現する。しかし、この格子は、さらに、他の次数の場合にも非常に高い効率を実現する。例えば、7次が9.27/7 = 1.32ミクロンで生じる。したがって、Zmuxのような格子は、C帯光と1310 nm光とを高い効率で同時に多重化することが可能である。図6は、単一ビーム102の形にコリメータ100によって光98Aが平行化されるように光98A-98nを多重化する、エシエル格子96を示す。

【0053】

数百nmを超えることが多き間隔で互いに広く間隔があいた波長のレーザー光を多重化するための遠距離通信分野以外の用途が、本発明に特に関連している。本発明のTDLASに基づくガス検出装置のような用途では、プローブビームのすべての波長成分が同一の空間領域を標本採取することが重要であり、および、多くの波長が、単一の化学種を検出するために、または、複数の化学種を検出するために必要であることがある。これらの用途のためには、エシエル格子に基づくマルチプレクサ/デマルチプレクサが特有の解決策を提供する。例えば、上述のエシエル格子に基づくデ/マルチプレクサは、各波長領域が互いに異なる格子次数に対応する、次の表3に示されている中心波長を中心とする大きな波長領域を多重化することが可能である。

【0054】

(25)

JP 2006-522338 4 2006.10.5

【表 3】

表 3

次数	中心波長 (ミクロン)	おおよその波長範囲 (ミクロン)
2	4.63	4.40-4.80
3	3.09	2.90-3.30
4	2.32	2.15-2.40
5	1.85	1.70-1.95
6	1.55	1.50-1.67
7	1.32	1.24-1.39

10

【0055】

14次までのおよび14次を超えるより高次の次数が、さらに、これに対応してより狭い波長範囲と多重化されてもよい。これらの波長のすべてのための単一モード伝送は、容易に入手可能な光ファイバでは不可能であるということが注目値する。本発明のガス検出装置104の一側面が図7に概略的に示されている。この側面は、上述の従来技術の具体例よりも優れている。多重化レーザ出力を有するTDLASの利点を強調する。図7の
20 実施形態では、互いに広く間隔があいた波長で動作するn個のレーザ源106A-106nが、エシエル格子108によって単一の光ファイバ110上に多重化される。単一のファイバ110からの光がコリメータすなわちビッチ光学部品112によって平行化され、および、分析対象である（炎のような）標本114の中を通過させられる。標本114の中を通過した後に、その光は別のエシエル格子116によって逆多重化される。各々の波長の伝送光は、対応する光検出器118A-118nによって検出される。レーザ106A-106nが狭いスペクトル領域（例えば1-2nm）全体にわたって同調させられ、および、標本114による吸収が、走査された各スペクトル領域全体にわたって監視される。このようにして、検査対象のガスが完全に識別および定量化されることが可能である。
30 ガス温度と圧力とのような他のパラメータが同様に測定されてよい。燃焼検出に加えて、互いに広く間隔があいた波長に基づくエシエル格子多重化/逆多重化技術は、医療装置が吐出し息の中のガスを測定することを可能にし、および、祖国防衛装置が化学兵器薬剤を検出することを可能にする。エシエル格子に基づくマルチプレクサと赤/緑/青サブ装置とを使用することによって、ディスプレイおよび顕微鏡視覚技術の分野における他の応用が可能である。

【0056】

モードノイズ

本発明のTDLASシステムの光学列（optical train）と、互いに広く間隔があいた波長から多重化された信号を必要とする類似の具体例とが、モードノイズの低減と高い効率の光収集という互いに対立する設計上の要件を原因として様々な設計上の難題をもたらす。モードノイズは、本明細書においては、測定対象のプロセスチャンバから光を収集するために、および、このプロセスチャンバに光を伝送するために使用されるファイバのコアの中における、時間および波長に応じて変動する不均一な光分布の結果として生じる検出光の信号レベルの変化として定義されている。
40

【0057】

マルチモードファイバでは、異なるモードが屈折率の変動を原因として異なる速度で伝播する。この場合に、ファイバ内の強度の分布は、互いに異なる有効経路長を経た伝播モードすべての干渉の結果として生じるスペックルパターンである。このスペックルパターンのすべての光が収集されて検出される場合には、強め合う干渉と弱め合う干渉とが互いに正確に打ち消し合い、および、伝送される出力の合計は波長またはファイバ長には依存
50

(76)

JP 2006-522938 A 2006.10.5

しない。クリッピングがある場合には、周辺減光または他の損失が生じさせられて、正確な打ち消し合いが行われず、かつ、検出された出力が波長および/または時間に応じて変化する。ファイバの長さ z の後での検出された出力に関する一般式は、

$$P = P_0 + \sum_{i,j} c_{ij} E_i E_j \cos \left[(2\pi \nu_0 \Delta n_{ij} z) / c + \Delta \phi_{ij}(T, \sigma) \right] \quad (2)$$

であり、前式中で、

P_0 = 波長非依存の平均出力、

E_i = i 次モードにおける光の振幅、

c_{ij} = i 次モードと j 次モードの間の重なり積分、

Δn_{ij} = i 次モードと j 次モードの間の屈折率の差、

$\Delta \phi_{ij}$ = 温度および応力を原因とする i 次モードと j 次モードの間の位相ずれである。

【0058】

正規直交セットのモードと無損失との場合には、 $c_{ij} = 0$ である。しかし、あらゆるビームクリッピング、または、周辺減光、または、あらゆるその他のモード依存損失が、何らかの $c_{ij} \neq 0$ の原因となる。このことは、平均伝送出力におけるリップルを生じさせる。

【0059】

50ミクロンコアを有する典型的な屈折率分布ファイバの場合には、屈折率の変化の合計 Δn が $\sim 1\%$ であるが、大半のモードがファイバコアの中心付近で大量の伝送時間を費やし、したがって、一般的に $\Delta n_{ij} \leq 0.0005$ である。一般的に入手可能な光ファイバ GIP50 が約 135 個のモードをサポートし、これは、適切に実現可能なビームクリッピングレベルを仮定すれば、波長走査中に顕著なモードノイズを生じさせるのに十分なだけ低い。

【0060】

モードノイズの具体例として、モードノイズを示す実現可能な最も単純なシステム、すなわち、1次元において最低のモードだけをサポートし、および、直交次元において2つの最低モードだけをサポートする方形導波路が、考察されることが可能であり、

最低モード: $E_1 = E_1^0 [\exp -i(kz - \omega t)] \cos \pi x / 2a$

その次のモード: $E_2 = E_2^0 [\exp -i(kz - \omega t)] \sin \pi x / a$

である。

【0061】

ファイバに沿ったポイント z における強度が、

$$I(x) = |E_1 + E_2|^2 \text{ であり且つ合計出力が } P = \int |E_1 + E_2|^2 dx \quad (3)$$

であり、前式中で積分がクリッピングと周辺減光との影響を含まなければならない。

【0062】

クリッピングがない場合には、 $P \sim E_1^2 + E_2^2$ であり、かつ、波長依存性がない。クリッピングの付加がその積分の限界を変化させることになる。クリッピングが追加の項 $\sim E_1 E_2 \cos \Delta \phi$ を結果的にもたらすことが示されることが可能であり、前式中で $\Delta \phi = \Delta k L = 2\pi \Delta n L / \lambda$ である。

【0063】

単一モードのファイバが本発明のキャッチ側の光学列で使用されることが可能な場合には、モードノイズは問題ではないだろう。しかし、マルチモードファイバが、典型的には、2つの理由から本発明のキャッチ側の光学列で使用されなければならない。第1に、測定体積 (10メートルを超える測定経路を有する燃焼室) を横断した後に、最初には単一モード (ガウス空間分布) のビームが著しく品質低下させられる。したがって、この大きく歪んだビームを単一モードのファイバの中に結合する効率は非常に低いだろう。そのビームは、煤と飛散灰とによる散乱と遮蔽とを主な原因として、測定体積の中を貫いて通過する時に3-4桁は減衰させられるので、このことは受け入れ難い状況である。単一モードのファイバを使用することによって生じる減衰の増加が測定を妨げるだろう。第2に、

(27)

JP 2006-522938 A 2006.10.5

火球中の屈折ビーム方向付け効果 (refractive beam steering effect) がそのビームの位置と照準とが不安定であることの原因となる。この効果がある場合には、単一モードのファイバのコアに規則性をもって「命中する (hit)」ことは困難だろう。

【0064】

一方、マルチモードファイバのコアは、単一モードのファイバのターゲット横断面積の2.5倍以上のターゲット横断面積を有する。したがって、ビーム方向付け効果は著しく低減させられることが可能である。さらに、マルチモードファイバの中への結合の効率が光の空間モードとは無関係なので、火球の中を通過した後に得られる低いビーム品質は問題ではない。

【0065】

しかし、マルチモードファイバ列の中で生じるモード依存損失が設計上の大きな難題である。マルチモードファイバのコアから発散する光分布が、ランダムなスペックルパターンを示し、すなわち、そのファイバの互いに異なるモードの間の強め合う干渉と弱め合う干渉とによって明るい区域と暗い区域のランダムなパターンを示す。このスペックルパターンが時間と波長とに応じて全体的に一定不変である場合には、このスペックルパターンは問題を生じさせないだろう。しかし、上述したように、ビームがマルチモードのキャッチ光学列内のどこかでクリッピングされる場合には、特に波長に応じたスペックルパターンの緩慢な変化が、モードノイズの原因となる可能性がある。このクリッピングを回避することは困難であり、このクリッピングを低減させることだけしかできない。したがって、モードノイズを低減させるための追加の方策が、そのシステムの検出感度を改善するために実現されなければならない。

【0066】

モードノイズを低減させる方法が幾つかある。上記の式2から、モードノイズは、

- 1) モード依存の損失を減少させ、すなわち、クリッピングを減少させ、それによって c_{ij} を小さく保ち、
 - 2) α を減少させ、それによって検査対象の吸収係数よりも著しく大きいようにモデルノイズの期間を増大させ、
 - 3) 低分散ファイバを使用することによって Δn_{ij} を減少させ、
 - 4) モードをスクランブルする（しかし、後述するように、すべてのモードスクランブル技術が同等に効果的であるというわけではない）。
- ことによって減少させられることが可能である。

【0067】

本発明のキャッチ光学部品は、モードノイズを低減させるために上記のもののすべてを含むように設計され具体化されることが好ましい。これらの光学部品は、そのシステムの概ね完全なアラインメントを仮定して、あらゆるビームクリッピングが低レベルで生じるように設計される。マルチモードファイバの長さを最小限に保つように努力が払われなければならない。しかし、用途によっては、環境調整された区域内に制御電気機器を有するために、 α が長くなければならない。 Δn_{ij} の値は、極めて高品質の低分散マルチモードファイバを使用することによって、低減させられることが可能である。さらに、キャッチ側のマルチモードファイバの機械的な操作によってモードをスクランブルすることによって、非常に優れた結果を得ることも可能である。

【0068】

マルチモードファイバで示されるスペックルパターンは時間と波長とに応じて変化し、および、さらには、そのファイバの機械的な位置に応じて変化する。そのファイバを屈曲させることと、そのファイバを特定の仕方で操作することとが、スペックルパターンが変化するを生じさせることが可能である。この機械的操作が一定の時間期間にわたって連続的に行われる場合には、そのファイバから放射される光の空間分布が比較的均一なパターンに平均化する。本発明のスクランブラの最も重要な点は、不可逆的な低レベルのビームクリッピングを被る時にモードノイズを発生させない均一な光ビームを平均的に生じさせるように、マルチモードファイバを機械的に操作することによって、モードノイズを

(26)

JP 2006-322938 A 2006.10.5

低減させることである。

【0069】

特定のファイバ操作モードの中には、他よりもモードノイズを低減させる上でより効果的であるものがある。特に、ファイバ上の何らかの他のポイントを基準としてそのファイバの縦(z)軸を中心としてそのファイバを捻ることが、スペckルパターンの変化を生じさせる。特に、得られる支配的な変化は、z軸を中心としたスペckルパターンの回転である。ファイバが機械的に回転させられるのと同じ距離だけスペckルパターンが軸を中心として回転することがないということが重要である。二次的な効果が、実際の光分散がこの回転によって幾分か変化させられるということである。スペckルパターンの回転は、応力によって生じさせられるファイバ内の屈折率の変化を原因とほしなが、このファイバ内の屈折率の変化は、スペckル強度パターンにおけるわずかな変化の原因である可能性がある。むしろ、この回転は、導波路が捻り運動の形で操作されるので、光がその導波路に完全に追従することが不可能であることを原因とする。

【0070】

この観察は、キャッチ側の光学列のためのマルチモードファイバの使用によって引き起こされるモードノイズを実質的に除去するために使用されることが可能である。本発明の極めて好ましい実施形態が、マルチモードファイバが中を通して配置されて締付け固定される中空軸モータを使用する。ファイバの遠隔セクションがこのモータの軸位置に対して迅速に保持され、および、このモータが $+360^\circ$ の移動とその次に -360° の移動とによって反復的に掃引される。この運動の周波数は、伝送される信号の効果的な平均化を可能にするために、かつ、キャッチ側のモードノイズの影響を著しく低減させるために、10ヘルツ以上であることが好ましい。

【0071】

さらに、測定領域を通して伝送されるべきすべての波長に関して単一モードのビームを生じさせることが必要なので、本発明のピッチ側の光学列は、大きな設計上の難問をもたらす。単一モードのファイバがピッチ側光学列の全体において使用可能である場合には、モードノイズは問題ではないだろう。しかし、ファイバは、制限された波長窓の全体にわたって単一モードの導波路としてだけ動作するにすぎない。特定のファイバに関する短い波長カットオフを超えて、光が幾つかのより高次の空間モードにおいてファイバを通して送られることが可能である。光がそのファイバから出て行く時に、これらのより高次のモードは干渉し合ってスペckルパターンを生じさせる。このスペckルパターンは時間および波長に応じて変動する。その次に、わずかな量のビームクリッピングが測定におけるノイズを生じさせる。

【0072】

これとは反対に、伝送されることが必要な最短の波長に一致する単一モードのカットオフを有するファイバが選択される場合には、より長い波長が、ファイバの中に結合される時に大きな損失を被るだろうし、および、このファイバは、より長い波長に関して大きな曲げ損失を示すだろう。

【0073】

この問題は、本発明のファイバ結合型波長多重化TDLAS検出/制御装置においては、1.76ミクロンの長さの波長を760nmまたは670nmの長さの波長と多重化することが必要なので、深刻な問題である。こうした広範囲の波長に関して単一モード動作と高い結合効率と低い曲げ損失とを実現する既知の単一の市販のファイバは存在していない。将来的には、フォトニック結晶ファイバがこの難問に対する解決策をもたらすだろうが、フォトニック結晶ファイバ技術は現時点では初期段階の状態である。

【0074】

図8に示しているように、本発明は、単一モードカットオフよりも短い波長に関するより高次の空間モードが生じることを可能にしないマルチモードファイバ120の非常に短い伝送区間を使用することによって、670nmまたは760nmから1.67ミクロンの単一モードビーム中の光を多重化およびピッチング(pitching)するという問題を改善

(29)

JP 2006-522930 A 2006.10.5

する。上記の式2を参照すると、マルチモードファイバの長さLが短い場合には、モードノイズが最小化されるだろう。この場合には、例えば、760 nmの光が1280 nmのカットオフ波長を有する単一モードファイバ（例えば、Corning SMF 28）の短い区間に結合されれば、その760 nmの光は少なくとも数メートルにわたって単一モードのままである。したがって、ピッチ側のモードノイズに対する解決策は、その760 nmの光が測定区域を通過して伝送されるように平行化される前に進むべき短い距離に対して、1280 nmよりも長い波長に関しては単一モードであるが760 nmに関してはマルチモードであり得るファイバの中に、その760 nmの光を結合することである。

【0075】

このシステムの略図が図8と図2に示されている。最初に図8を参照すると、互いに広い間隔があいたレーザ発振周波数でレーザ発振する複数のレーザ源120が、個別の単一モード光ファイバ122A-122nに結合されている。1349 nmから1670 nmの波長でレーザ発振するダイオードレーザがマルチプレクサ124によって多重化される。マルチプレクサ124の出力が、大きな伝送損失なしにかつモードノイズの発生なしに1349 nmから1670 nmの範囲内の波長を有する光を伝送するのに適した寸法を有する、ピッチ側の光ファイバ126に結合される。これらの波長に適している光ファイバは Corning SMF 28 である。しかし、760 nmの入力は、多重化されて SMF 28 光ファイバに結合される場合には、比較的短い距離にわたる伝送の後に、マルチモーダルになるだろう。したがって、760 nmレーザの出力が、SMF 750 のような1280 nm未満の波長に対して単一モードであるファイバに結合される。入力ファイバ122 n中を伝送されるレーザ光と、ピッチ側の光ファイバ126の中を伝送される多重化レーザ光とが、ピッチ光学部品128の付近で結合されることが可能である。カプラ130とピッチ光学部品128とが短い伝送光ファイバ132によって光学的に接続され、および、その伝送光ファイバ132が大きな損失なしに結合および多重化された波長のすべてを伝送するように選択されることが好ましい。図8に示されているシステムに適している伝送光ファイバが Corning SMF 28 だろう。光ファイバが比較的短ければ、伝送光ファイバ132に結合される760 nmレーザ光はマルチモーダルな挙動を示さないだろう。図8に示されているシステムとファイバの場合には、伝送光ファイバが、大きなマルチモーダルノイズの発生を回避するために3メートル以下の長さに保たなければならないということが判明している。

【0076】

類似のシステムが図2に示されており、このシステムでは、カプラ136が、760 nmダイオードレーザからの入力と、より著しく長い波長を有するダイオードレーザからの多重化ビームからの入力とを受け取る。

【0077】

アライメント調整システム

本発明の検出システムが、熱の効果と風と振動とからの運動をそれ自体が受けるボイラまたは他の過酷なプロセスチャンバの上にピッチ光学部品とキャッチ光学部品とがボルト固定されていても、そのピッチ光学部品とキャッチ光学部品とが最適なアライメントを維持することを可能にする自動アライメント調整機能を含むことが好ましい。本発明の極めて好ましい実施形態では、ピッチ光学部品とキャッチ光学部品の両方がフィードバック制御されたチップ／チルト段 (tip/tilt stage) 上に装着される。このピッチ光学部品とキャッチ光学部品の両方がチップ／チルト段の上に装着されるという必要条件は、センサが完全にファイバ結合されるという事実起因する。したがって、多重化された光が、入力ファイバに直接取り付けられている平行化ピッチ光学部品によって測定領域をはさんで放射され、および、キャッチ光学部品が、典型的にはマルチモードファイバである出力ファイバの中に伝送光を直接結合させる。したがって、キャッチ光学部品は、ピッチ光学部品から放射されるビームと同一直線上にあるように方向付けられなければならない。このことは、集束された伝送ビームがマルチモードキャッチファイバの受容円錐 (acceptance cone) 内に到着するために必要である。

(30)

JP 2006-522938 A 2006.10.5

【0078】

(例えば、石炭伊内の火災からの) 強い背景光から伝送レーザ光を識別するために、検出器の視野と焦点とが、入力レーザ光と同一の方向および位置を有する光だけを検出するように制限されることが可能である。これは、適切な検出器に結合されている光ファイバの中に検出光を集束させることによって簡便に行われてよい。本発明の実施形態の基本的な光学システム設計が図9に概略的に示されている。図7のトランスミッタ136は、ピッチ光学部品138、すなわち、1つまたは複数の層の平行化レンズのようなコリメータと、これに関連した装着/アラインメント調整構造と、電子機器とから成る。同様に、図7のレシーバ140は、ピッチ光学部品に類似した構造またはピッチ光学部品から変更された構造のキャッチ光学部品142と、これに関連した装着/アラインメント調整電気機器とから成る。トランスミッタ/レシーバ対の効率と背景識別は、アラインメント公差に関連付けられている。最も高い効率と背景識別を得るためには、トランスミッタとレシーバの両方に関するアラインメント公差は厳格である。トランスミッタは、図10に示されているように、伝送される光の大部分がキャッチ光学部品142の開放口に当たるように十分なだけ正確に方向付けられなければならない。典型的なシステムでは、これは、典型的な10メートルの伝送距離において1cmの公差、すなわち、1ミリラジアンに相当する。(5メートルから30メートルのターゲット距離と、1cmから3cmの放射スポットサイズとの場合には、圓折はわずかな寄与である)。

【0079】

図11に図解されているように、レシーバの角許容性 (angular acceptance) が、キャッチ光学部品150の焦点距離によって割り算されたファイバコア148の直径によって決定される。より短い焦点距離が角許容性を増大させるが、これに対応してレシーバの開放口がより小さくなる。適切な開放口と角許容性とを有する妥協点が、焦点距離50mmのレンズと50マイクロメートルのコアのファイバとを使用することである。このことが、2cmの開放口と1ミリラジアンの角許容円錐 (cone of angular acceptance) とを結果的にもたらす。

【0080】

したがって、好ましいアラインメント調整システムは、合計で4つの自由度のためにチップ (tip) とチルト (tilt) の両方において1ミリラジアンの公差で互いに向き合うように2つの光学部品を配置しなければならない。これらの4つの自由度は、一方の側の大まかなアラインメント調整と、その後続く、他方の側の4次元アラインメント調整 (チップ、チルト、および、xとyにおける横方向位置) とによって実現されてよいが、しかし、このことは、大きな横方向の動きが許容可能であることを前提としている。ターゲット環境に対するアクセスポートが1インチほどの小ささである可能性があるため、これは潜在的に不確実な解決策である。この代わりに、両側における能動的な照準アラインメント調整が、制限された空間が横方向の動きに対して使用可能である時に適正なアラインメントを確保することが可能である。

【0081】

ピッチ光学部品とキャッチ光学部品の厳密なアラインメントが過酷で可変的な環境内において維持されなければならない。振動、風荷重、温度変化、および、他の構造的変動のすべてがミスアラインメントの原因となり、および、同様に、トランスミッタおよびレシーバの光学機械装置における機械的クリープもミスアラインメントの原因になるだろう。ミスアラインメントは、さらに、定期的な保守整備の後に、トランスミッタヘッドおよびレシーバヘッドがクリーニングのために取り外されて再び取り付けられる時に発生することが予想される。本発明の光学システムが、50ミリラジアンに近づく可能性があるシステムのミスアラインメントにも係わらず、その1ミリラジアンの光学アラインメントを維持することが可能であることが理想的である。アラインメント調整システムは、さらに、出力停止中に位置を保持し、全信号損失を許容し、および、アラインメントを失うことなくオフにされるべきである。最後に、好ましくは、このシステム自体が、露出された工業的環境において長期間にわたって連続的に機能するのに十分なだけ堅牢でなければならな

(31)

JP 2006-521938 A 2006.10.5

い。

【0082】

図12は、アライメント調整可能なピッチ光学部品またはキャッチ光学部品の実施形態を概略的に示す。トランスミッタとレシーバは設計が類似している。トランスミッタは、光ファイバから出てくる光から平行化レーザー光ビームを発生させ、および、レシーバは、レーザー光の平行化ビームを捕捉してファイバの中に集束する。(この光学システムを通して光を逆方向に送ることが可能であり、および、トランスミッタおよびレシーバの素子の大部分が互いに同一である。)トランスミッタ光学部品とレシーバ光学部品は、環境からこれらの光学部品を保護するためにNEMA-4容器の中に装着されてよい。以下の説明はトランスミッタモジュールとレシーバモジュールのどちらにも当てはまる。

【0083】

図10に示すように、前平行化ファイバ/レンズ対152が、光学軸に対して垂直なチップ/チルトを可能にするように配置されている運動チルト段(kinematic tilt stage)154に取り付けられている。2つの直結駆動ステップモータ156がチップ/チルトを実現する。これらのモータは、イーサネット(登録商標)または類似の接続を介してコンピュータによって制御される。この接続は、電気的な干渉を回避するために光ファイバを経由してよい。ステップモータ155は、電力が取り除かれる時にそのステップモータの状態を保持し、したがって、光学アライメントは電力供給停止によって影響されることはない。

【0084】

定期的または連続的なシステムアライメント調整の最中に、制御コンピュータが、伝送されて検出されるレーザー光の量を監視する。個別のアライメント波長が、図3の可視光供給源64のような連続的または定期的なアライメント調整処置のために提供されることが可能であることが好ましい。何らかのミスアライメントがこの検出された信号を減少させるだろう。自動アライメント調整モードでは、コンピュータが検出された信号を測定して、一方向に小さな量だけ動くように2つのステップモータの一方のモータを制御し、その次に、その検出信号を再測定する。その検出信号が増大する場合には、コンピュータが、その信号が増大しなくなるまで、ステップモータを同一方向に再び動くように制御する。その次に、コンピュータは、検出信号を最大化するために他方のステップモータが直交軸に沿って動くように制御し、その次に、他方のセンサヘッドに関してこのプロセス全体を繰り返す。検出信号が増大するのに応じて、自動アライメント調整プロセスが数十年間の信号サイズにわたって進行するように、検出器の増幅器利得が自動的に減少する。自動アライメント調整システムは、ナノワットからミリワットの検出出力と共に機能することが可能である。

【0085】

この「ヒルクライミング(hill-climbing)」アルゴリズムは、大きなノイズの存在下において、信号のほぼ完全な損失の後にそのシステムをアライメント調整することが可能であり、および、他のアライメント調整システムが制御電子機器の限界までのミスアライメントを発生させる原因になる可能性があるビームの遮断と、電力供給停止と、機械的衝撃と、他の外乱とに対して耐久性がある。自動アライメント調整に必要とされるものは、位置空間内のグローバル最大を有する有限信号だけである。個々の設置条件に応じて、自動アライメント調整が、例えば1時間毎のような設定された時間間隔で定期的に行われてもよく、または、数日の運転日のような長期間の後に必要に応じて行われてもよい。制御コンピュータは、事前設定された閾値よりも信号が低下する時にだけ、検出信号を監視して自動アライメント調整することができる。

【0086】

トランスミッタモジュールとレシーバモジュールは、工業用途のために有用な幾つかの他の特徴を含んでもよい。採用随意のセンサが、これらのモジュールがクリーニングまたは保守整備のために所定位置から移動させられてすべてのレーザーが安全のためにオフにされる時点を検出してもよい。図10に示されているように、電気的接続および光学的接続

(32)

JP 2006-522938 A 2006.10.5

のすべてが保守整備作業によって妨害されないように、こうした接続のすべてがヒンジ 158 を経由して行われてもよい。容器 160 が高感度の内部光学部品を汚染物質から保護し、および、ホーサブル (hosable) であることが好ましい。ヒンジの動作範囲は、操作員の負担を軽減するために制限されてよい。各センサヘッドが自動アライメント調整中に 10 ワット未満の入力電力しか必要とせず、および、自動アライメント調整が完了した後は 0.1 ワット未満の入力電力しか必要としないことが好ましい。

【0087】

従来の設計が、異なる用途に適していることが可能である。HEM-A-4 容器等級が必要とされない場合には、サイズと重量との著しい削減が可能である。異なる伝送距離が、異なる焦点距離と開放口の光学部品が捕捉された信号を最適化することを可能にする。ファイバ/レンズアセンブリ全体を動かすことによって照準を制御するための上記のステップモータ駆動サドルに対して、ファイバが、より著しく小さい質量を動かしながら同一の照準の変化を生じさせるために、レンズに対して相対的に横方向に移動させられてもよい。さらに、ピエゾ電気素子またはボイスコイルのような様々な電気機械装置が、自動アライメント調整システムの速度を増大させるために使用されてもよい。

【0088】

上述のアライメント調整の問題に加えて、ピッチ光学部品とキャッチ光学部品との特定の選択が、次の通りの幾つかの形で、本発明の IDLAS 検出システムの性能に影響を与える可能性がある。

(1) 検出器に結合された信号強度がピッチ/キャッチ効率に依存する。

(2) 検出器に結合された不要な背景放射の量がキャッチ光学部品の *etendue* に依存する。

(3) 760 nm における *few-mode noise* (few-mode noise) の効果が、ピッチ/キャッチ構成に対して非常に敏感である。

(4) ノイズ特性 (小さいが、より安定しているか、または、より大きい、激しい変動を伴う) が、発射されるビームのサイズに依存すると予想される。より大きい発射ビームが好ましい。

(5) システムのミスアライメント感度が、ピッチ焦点距離およびキャッチ焦点距離と、これに関連したファイバサイズとの一次関数である。

【0089】

典型的な石炭燃焼発電所の燃焼区域の非常に単純な状況が、光学成分選択分析のために採用されることが可能である。この分析の目的は、火球の詳細に関する可能な限り少ない知識だけによって、火球の中を通過するレーザービームに対する一般的な影響に焦点を当てることである。火球を横断することは、光ビームに対する次の 3 つの影響を有する。

(1) すずの微粒子が光の一部を吸収する。

(2) 大きな角度の屈折または散乱が、光の一部がキャッチ光学部品に到達することを妨げる。

(3) 光が多数の小さい温度勾配を通過し、および、したがって、ランダムに方向付けられるが、依然としてキャッチ光学部品に到達する。

【0090】

この第 3 の光のカテゴリだけが収集のために使用可能である。典型的な光線が火球を横断する最中に複数の屈折事象を受けると仮定すると、その光線の方法はランダムな経路を辿り、および、その初期方向からずれる可能性がある。光線が、類似しているが同一ではないずれを被る他の光線で構成されているより大きいビームの一部である場合には、そのビームに対する火球の影響が、次の 4 つの異なるタイプの変化を引き起こす。

(1) ビーム全体の全方向における変化、

(2) ビームの中心軌跡の位置の変化、

(3) ビームサイズの変化、

(4) ビームの開口/波面の平面度の変化。

【0091】

(33)

JP 2006-522938 A 2006.10.5

これらの4つのタイプの変化は、収集効率に影響を与えるビームに対する大きな効果の原因となる物理的現象の如何に関わらず、これらの大きな効果のすべてを含むパラメータである。

【0092】

火球中での光線がランダムなずれを被る場合には、この光線の方法は、標準的な拡散依存性にしたがって初期の（通常は最適の）方向から拡散するだろう。しかし、当初の軸からの光線の距離はその以前の方法に依存する。したがって、火球の詳細によって決定される特定の量のrmsビーム方向付けの場合に、正比例した量のビームオフセットが予想されることが可能である。火球を横断するレーザービームがその当初のサイズの数倍に拡大される場合には、最終的なビームのサイズと最終的なビームの関きとの間に同一の関係が当てはまる。 15

【0093】

キャッチ光学部品上に入射する光の角度と位置とビームサイズとが分かれば、光収集効率を推定することが可能である。この推定は、単純な光線光学部品と、フラットトップ強度 (flat-top intensity) と、単純な推定、ファイバ開口数NAの範囲内でありかつファイバのコアに当たるように照準されているキャッチ光学部品上に入射する光の量を仮定する。この最終結果がオフセット角度空間 (offset-angle space) における「丘 (hill)」である。最適のアライメントを仮定すると、収集効率はその丘の頂上に近いが、ビームの角度と位置とが変動するのに応じて急速にその丘を越えておよびその丘の付近で変化するだろう。この収集効率の丘が可能な限り高くかつ広大であることが好ましい。この丘に 20 関する次の幾つかの特徴が注目される。

(1) (ゼロのビームオフセットとチルトの場合の) 収集効率の丘のピーク高さが、キャッチ光学部品が入射ビーム全体を捕獲するのに十分な大きさではない場合に、キャッチ光学部品のetendue (焦点距離×NA) の2乗に比例しており、このポイントにおいてはキャッチ効率が100%である。

(2) 丘が長円であり、および、キャッチ焦点距離を変化させることが、一方の軸をより長くし、かつ、他方の軸をより短くする。

(3) ビームのジッタを原因とする光収集効率の変動がノイズ発生源である。

【0094】

上述の分析方法に基づいて、異なるピッチ／キャッチ組合せの信号対ノイズ比が比較で 30 ける。乗法ノイズが同一であると仮定すると、火球暗騒音または検出器ノイズが優勢である場合にだけ、異なるキャッチ光学部品がその最終的な性能において互いに異なる。

【0095】

本発明の目的が、本明細書に開示されている実施形態によって完全に実現されている。当業者は、本発明の本質的な機能から逸脱することなしに、本発明の様々な側面が、異なる実施形態によって実現できるということを理解するだろう。こうした特定の実施形態は例示のためのものであって、後述の特許請求項に記載の本発明の範囲を限定することは意図されていない。

【図面の簡単な説明】

【0096】

【図1】 図1は本発明の検出装置の略図である。 40

【図2】 図2は、燃焼室の付近の構成要素に光学的に結合されている遠隔配置された構成要素を特徴とする、本発明の検出装置の略図である。

【図3】 図3は、複数の検出格子を特徴とする本発明の側面の説明図である。

【図4】 図4は、従来技術の単一ビームガス検出装置の説明図である。

【図5】 図5は、従来技術の複数ビームガス検出装置の説明図である。

【図6】 図6は、本発明におけるエシェル格子の使用の説明図である。

【図7】 図7は、本発明のエシェル格子に基づくダイオードレーザ分光ガス検出装置の説明図である。

【図8】 図8は、モードノイズを最小化するのに適しているピッチ側光学システムの説明 50

(34)

JP 2005-522938 A 2006.10.5

図である。

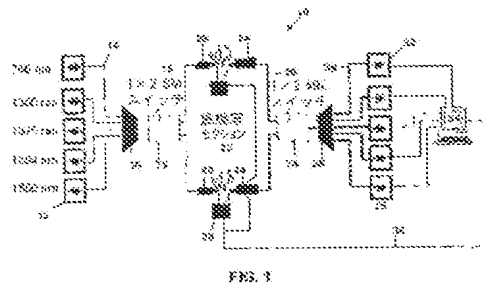
【図 9】 図 9 は、ファイバ結合ガス検出装置の説明図である。

【図 10】 図 10 は、ピッチ光学部品とキャッチ光学部品との間で損失される光の説明図である。

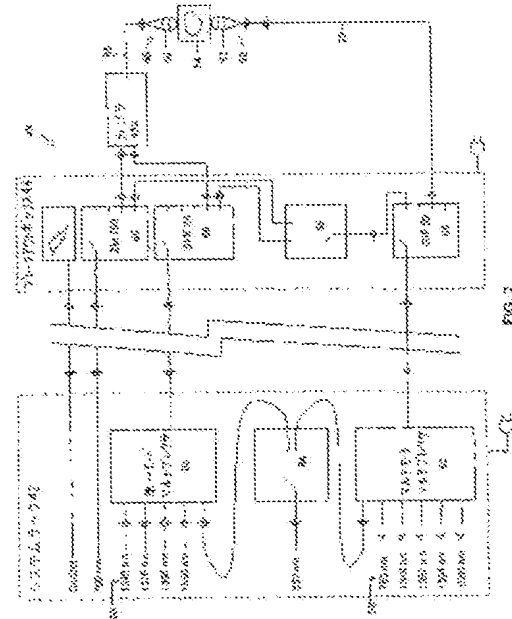
【図 11】 図 11 は、ファイバ光学システムの角許容円錐の説明図である。

【図 12】 図 12 は、本発明のアライメント調整機構の略図である。

【図 1】



【図 2】



(35)

JP 2006-522938 A 2006.10.5

【図 3】

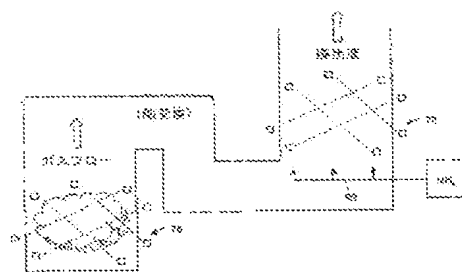


FIG. 3

【図 5】

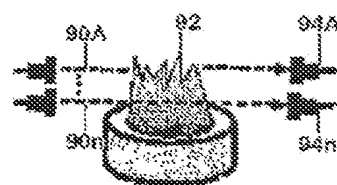


FIG. 5

【図 4】

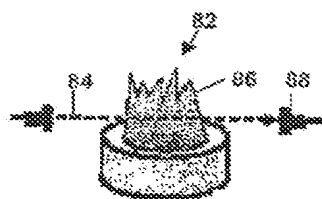


FIG. 4

【図 6】

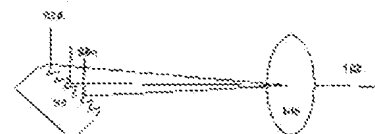


FIG. 6

【図 7】

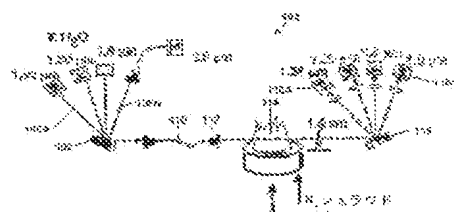


FIG. 7

【図 9】

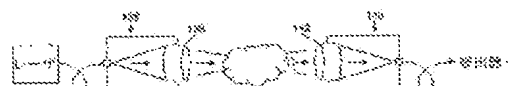


FIG. 9

【図 10】

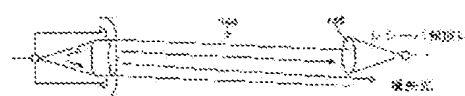


FIG. 10

【図 8】

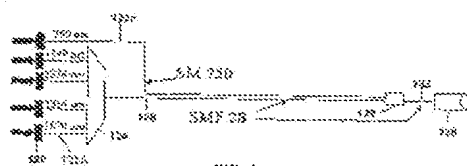
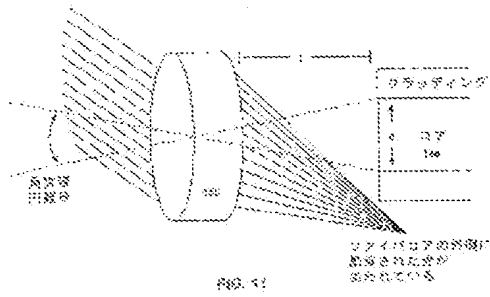


FIG. 8

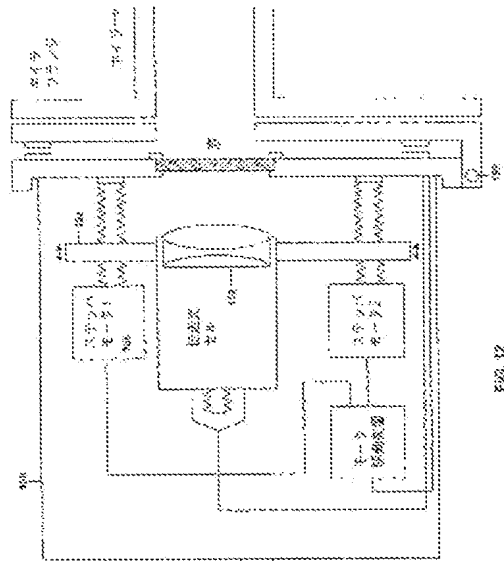
(36)

JP 2006-523936 A 2006.10.5

【図 11】



【図 12】



(33)

JP 2005-522338 A 2006.10.5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/US04/10048
C. (Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Character of document, with indication where appropriate, of the relevant passage	Relevant to claim No.
X	US 5,905,129 A (Quaschnick) 28 September 1999 (28.09.1999), see entire document.	1-83
---	US 2002/0181858 A (Sprey et al) 15 December 2002 (15.12.2002), see entire document.	9-13, 36, 56-61, 63, 68, 70, 71
Y		

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (January 2004)

(39)

JP 2006-522998 A 2006.10.5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2006/00008

Continuation of U.S. PUBL. NO. SEARCHED Item 3:
Doc:
search terms: sensor, multiplexed, combination, POC, sensitive, twist, detector, optical fiber

Form PCT/ISA/210 (exam sheet) January 2004

(40)

JP 2006-323938 A 2006.10.5

フロントページの続き

(51)Int.Cl.

F I

テーマコード(参考)

B 0 1 D 53/34 (2006.03)

B 0 1 D 53/36 1 0 1 A

B 0 1 D 53/94 (2006.03)

(51)指定国 AP(BW,CH,OM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AG,AZ,BY,KG,KZ,MD,EU,TJ,TM),EP(AT,EE,EG,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PL,PT,RO,SE,SI,SK,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GG,GN,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AZ,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BE,BG,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DH,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,HR,HU,IE,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MH,MW,MY,MZ,NA,NE,NG,NZ,OM,PG,PH,PL,PT,RO,RU,SC,SD,SE,SG,SK,SL,SV,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,YO,ZA,ZM,ZW

(74)代理人 100113026

弁理士 倉地 保幸

(74)代理人 100082898

弁理士 西山 純也

(72)発明者 サッビー、アンドリュー ディー、

アメリカ合衆国、コロラド 80215、レイクウッド、タボール ストリート 1845

(72)発明者 ハウエル、ジェームズ

アメリカ合衆国、コロラド 80027、ルイスビル、ホップトリー コート 542

(72)発明者 オフバンダー、ヘンリック

アメリカ合衆国、コロラド 80303、ボルダー、ジェネシー コート 126

(72)発明者 マスターソン、ビー、ビー、

アメリカ合衆国、コロラド 80527、ルイスビル、ウエスト アイゼンハワー ドライブ 325

Fターム(参考) 2G059 A401 A405 B801 CC04 CC05 CC07 D012 EE01 EE11 GG01

HH01 HH02 JJ05 JJ17 KK01

3K03 EA07 FA07 FB04 FB05 GA06 HA04

3K05 QA01 QA06 QB03 QC04 RA02

4D02 AA12 BA06 DA07 EA07 GA02 GB02 HA03

4D04 AA06 AB02 AC04 DA01 DA02 DA03 EA05